

荷重状態を考慮したトンネル覆工の力学的特性に関する考察

独立行政法人土木研究所 真下 英人 ○砂金 伸治
日本道路公団試験研究所 城間 博通 馬場 弘二

1. はじめに

近年の道路交通の発展に伴い道路トンネルの建設箇所が増加しつつあり、また、覆工コンクリートの剥離および剥落といった問題が発生している。トンネルの建設コストの縮減と耐久性の向上を図っていくためには、掘削する地山の特性に応じた合理的で耐久性の高い、かつ経済的にも優れたトンネル構造を構築する必要がある。

本研究では、覆工の設計法を確立するための基礎データを収集する目的で、使用材料および荷重状態の影響を考慮したトンネル覆工載荷実験を行った。また、その結果に基づき、ひび割れの進展を考慮した数値解析を実施することにより、覆工のもつ力学的特性について検討を行った。

2. 研究方法

載荷実験では写真-1に示すような覆工を模擬した半円形の供試体を作成し、それに図-1に示した3通りの載荷形式A、BおよびCの載荷を行った。載荷形式Aは山岳トンネルにおいて覆工に緩み荷重が作用したと想定される場合、載荷形式Bは覆工の天端および肩部背面に空洞が発生した状態で覆工に上部から荷重が作用したと想定される場合、また載荷形式Cは特殊地山で全周から荷重が作用したと想定される場合である。載荷は覆工の右側脚部を0度と定義した座標系で考えた場合、載荷形式Aでは10～170度全ての17断面、載荷形式Bでは10～40度、90度および140～170度の9断面で軸力の導入を実施し、その後、載荷形式Aでは天端の80～100度の上部3断面、載荷形式Bでは天端の90度の1断面のみで載荷を継続し、残りの部分のジャッキはバルブを閉めることでジャッキを地盤反力ばねに模擬



写真-1 覆工の供試体の概要

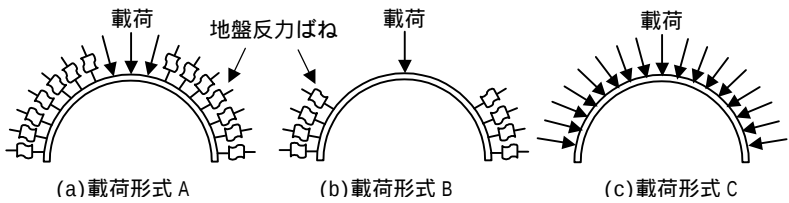


図-1 載荷形式のイメージ

した。実験は使用する材料と載荷形式の影響を把握できるように表-1に示す～のケースの実験を行った。

数値解析はひび割れの進展を考慮できる有限要素解析により実施した。覆工は平面応力要素と仮定し、Kupferの破壊規準を用いた。また圧縮強度、ヤング率およびポアソン比は実験時の材料試験結果から得られた値を用い、引張強度は圧縮強度から推定した。圧縮特性はコンクリートの圧縮ひずみが2000 μ に達するまでは2次曲線で、それ以降は剛性の変化はないものと仮定した。また引張特性はプレーンコンクリートの限界のひび割れ開口幅を0.02mmと仮定した。地盤反力ばねは引張の影響を考慮しないものとした。実験を再現する場合の地盤反力ばね定数は50MN/m(地盤反力係数で60.95MN/m³程度)とし、それに加えてトンネル標準示方書(開削工法編)に示された地盤反力係数の算定式に基づき、地山の变形係数をそれぞれ2000MN/m²(C級程度を想定)、150MN/m²(D級程度を想定)、および10MN/m²と仮定し、それぞれの場合の地盤反力係数を算定し、それを基に実際の地山条件に近似した場合の解析を行った。

表-1 供試体の諸元

実験ケース番号						
覆工厚・覆工の外径(mm)	300・9700					
鋼繊維混入率(%)	-	0.5	-	0.5	-	0.5
鋼繊維長さ(mm)	-	60	-	60	-	60
載荷形式	A	A	B	B	C	C
平均一軸圧縮強度(N/mm ²)	26.3	19.9	26.7	20.9	14.6	12.8
平均曲げ強度(N/mm ²)	-	3.88	-	4.88	-	4.43
平均曲げタフネス(N/mm ²)	-	3.61	-	7.52	-	4.40

キーワード：トンネル、覆工、載荷実験、鋼繊維補強コンクリート、ひび割れ
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 TEL：0298-79-6791

3. 研究結果および考察

図-2 に ～ における荷重変位曲線，図-3 に ～ の肩部 65 度における荷重とひずみの関係を示す。載荷形式 A により実験を行った および の供試体は肩部 65 度または 115 度付近から破壊した。実験時の観察結果と図-3 のひずみの値より，圧縮による破壊であったと考えられる。変位やひずみの変化の割合が では より若干緩やかな程度であり，軸力が支配的と考えられる。載荷形式 A では鋼繊維の有無の影響は覆工の挙動に明確に現れていなかったと考えられる。しかし，鋼繊維を用いた ではひび割れが分散して発生し，供試体の破壊後も覆工からコンクリートの剥落は観察されなかった。また， の圧縮強度は の約 1.32 倍で，破壊時の荷重は は の約 1.18 倍であったことから，破壊時の荷重の差は概ね圧縮強度の差に近いことが分かった。

載荷形式 B により実験を行った および では， は より供試体の圧縮強度が大きいのにもかかわらず，載荷可能な最大荷重はの方が小さくなった。図-4 に の載荷可能な最大荷重の直前でのひび割れ図を示す。載荷形式 A では 3 断面でひび割れが発生した後に破壊に至ったのに対し，載荷形式 B では 5 断面でひび割れが発生した。また，図-3 に見られるように， および では全ての断面で圧縮ひずみが 3000 μ 程度を超えなかったため，供試体の最終状態は圧縮の限界に達するのではなく，ひび割れが進展して構造的に不安定になり最終的に載荷が不可能になったものと考えられる。このように曲げモーメントが支配的で，引張の影響が表れやすいような荷重状態ではコンクリートの引張特性を改善する効果のある鋼繊維補強コンクリートは耐力の向上につながると考えられる。

載荷形式 C により実験を行った および では，ひび割れは破壊に至るまで観察されず， では 5 度付近で載荷荷重が 290kN/本， では 175 度付近で載荷荷重が 250kN/本において脚部付近から圧縮によるせん断破壊が生じた。破壊荷重の差は載荷形式 A の場合と同様，概ね圧縮強度の差であった。破壊時は はコンクリートの剥落が生じたが， は微細な破片が落下した程度であった。

図-5 に においてひび割れの進展を考慮した数値解析から得られた荷重変位曲線を示す。実験結果より肩部の圧縮破壊を覆工の終局と考え，肩部の圧縮ひずみが 3500 μ に達した時点解析上の終局と仮定して解析を行ったところ，実験値と解析値は概ね合致することが分かった。また地盤反力係数を変化させることで種々の地山条件を模擬し，肩部の圧縮ひずみが 3500 μ に達するまで解析を行ったところ，終局に達した時の荷重が大きく異なった。これより覆工の耐力を最終的に判定する場合は様々な地山条件を考慮する必要があることが分かった。

4. まとめと今後の課題

覆工のもつ耐力は荷重状態と関連性があり，曲げモーメントが支配的となる条件では鋼繊維の補強効果が表れ，耐力が増加するものの，軸力が支配的となる条件では鋼繊維による耐力の増加を期待できないことが実験的に示された。しかし剥落防止については荷重状態に関わらず効果が期待できることが分かった。

今後は，覆工の材料，様々な地山条件および荷重状態を考慮し，覆工の耐力を検討する予定である。

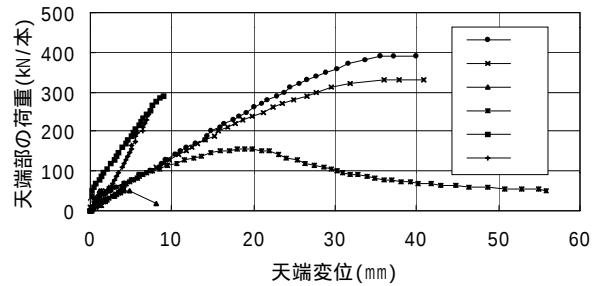


図-2 荷重変位曲線 (90°部分，高さ50cm)

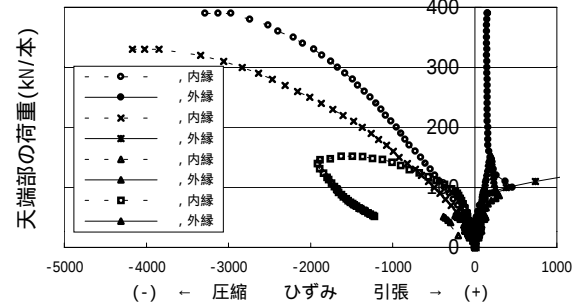


図-3 荷重 - ひずみ関係(65度)

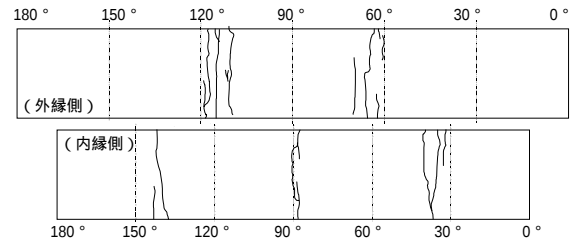


図-4 ひび割れ図 (, 天端変位 14.0mm)

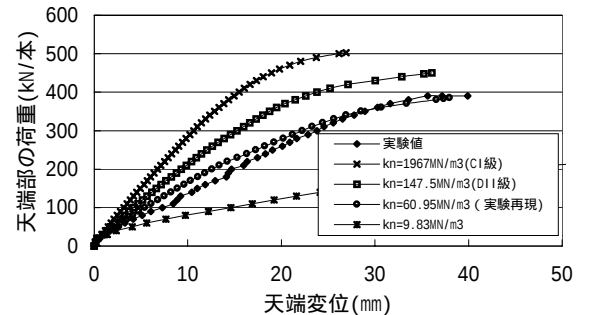


図-5 の荷重変位曲線の比較